

光具座测量透镜焦距的自动调焦方法研究

张伟, 张晓辉, 刘振江

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130021)

摘要: 在原来光具座测量透镜焦距的装置基础上, 用 CCD 代替人眼作接收器时, 正确判定焦面是实验的关键。本文基于点扩散函数理论提出评定焦面的一种方法, 并对这种方法进行理论分析。实验结果与理论分析相吻合。实验表明, 该方法调焦精度可达到 $\pm 4\mu\text{m}$ 范围内, 比目测精度提高了大约 $1.5\mu\text{m}$ 。

关键词: 焦距; 线阵 CCD; 点扩散函数

中图分类号: TN206-34

文献标识码: A

引言

焦距是光学系统的一个基本参数, 也是光学系统装校过程中必须已知的参数^[1], 而透镜是组成光学系统的最基本部件。因此, 透镜的焦距自然是确定其物像关系的重要参量。同时, 透镜的焦距是否精确将直接影响整个光学系统的焦距, 故透镜焦距的精确测量显得十分重要。

目前国内外通常采用的透镜焦距测量方法是放大率法和精密测角法。本文采用放大率法在光具座上测量透镜焦距(也可在专用焦距仪上进行)。在传统的焦距测量中, 焦面是由人眼判读目标所成像的清晰度来确定的。本实验采用 CCD 代替人眼作为接收器, 经驱动电路和 A/D 转换后输入微机进行信号处理, 实现实时、高精度自动调焦。在透镜焦距的测量中, 焦面的正确判定是测量的前提和关键。本文基于点扩散函数理论, 提出一种评判焦面的方法。

1 测量原理

将待测正透镜置于平行光管物镜前, 平行光管物镜焦面处装有玻罗分划板, 如图 1 所示。设分划板刻线的间距为 y , 在待检透镜焦面上对应的像间距为 y' , 平行光管物镜焦距为 f_c' , 待测透镜焦距为 f' , 则 $f' = \frac{y'}{y} f_c'$ ($\text{tg}\omega = \frac{y}{2f_c'}$, $\text{tg}\omega' = \frac{y'}{2f'}$, $\omega = \omega'$)。当选用带有测微目镜

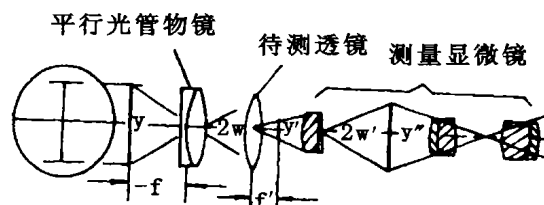


图1 测正透镜焦距原理图

Fig. 1 Diagram of measurement of positive lens focus

的显微镜测量时, y' 经测量显微物镜放大的像

收稿日期: 2002-03-31

作者简介: 张伟(1976-), 男, 吉林长春市人, 中国科学院长春光机与物理研究所硕士研究生, 现主要从事光学测试与检测方面的研究。

为 y'' , 则 $y'' = \beta y'$, $f' = \frac{y''}{\beta y'} f c'$ 。其中 β 、 $f c'$ 、 y 均给定, 只要测得 y'' , 即可得待测透镜焦距^[2]。由于本实验采用 CCD 代替人眼(如图 2 所示), y' 经测量显微镜物镜放大的像 y'' 成到 CCD 接收器上, CCD 将接收到的光信号转变成电信号, 经 A/D 转换输入微机后, 进行数据处理。由于 y 为分划板锐细的亮线对间距离, 而每一条锐细的亮线经显微物镜成在 CCD 上对应于一尖锐的 CCD 输出信号, 当系统合焦时, y'' 即为两对应 CCD 输出信号间距离, 即

$$y'' = L \cdot (x_2 - x_1)$$

式中, L 为 CCD 两相邻光敏像素间距; x_2 和 x_1 为 CCD 输出尖锐信号对应的位置坐标。

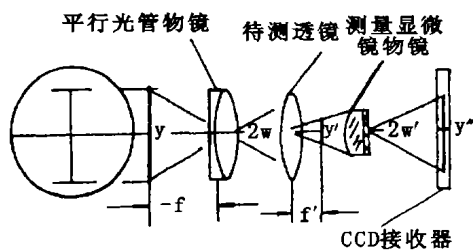


图 2 测正透镜焦距原理图

Fig. 2 Diagram of measurement of positive lens focus

对于负透镜, 由于其成虚像, 为了观测, 要求显微物镜的工作距必须大于待测透镜的后顶焦距, 故往往选择放大率为 1 或更小的显微物镜。由于两者原理相同, 且正透镜应用范围较广, 本文只讨论正透镜焦距的测量。

2 目测调焦的精度

在透镜焦距的测量中, 焦面位置的正确判定是关键, 因为只有透镜处于焦面位置才能运用原理中的公式进行计算和测量。传统的焦距测量中, 由于焦面是由人眼通过所成像的清晰度来判断的, 故此种方法的调焦误差可由以下公式计算^[2]:

26

$$\text{极限误差}(\mu\text{m}) \quad \Delta x = \left(\frac{73n\alpha}{2\Gamma NA} + \frac{n\lambda}{3NA^2} \right)$$

式中, α 为人眼的极限分辨角(在正常照度, 白光照明, 人眼瞳孔直径为 2mm 时, 其值为 1—2', 在此取作 2'); n 为物方折射率(在此取为 1); Γ 为读数显微镜的倍率(经测量为 115.6); NA 表示显微物镜的数值孔径(尺寸为 0.25); λ 为入射光波长(0.55 μm)。将这些数据代入计算得到本实验中的人眼的调焦误差为 5.45 μm 。

3 焦面的判定

由 CCD 代替人眼作接收器, 如何选取恰当的焦面评判函数, 并保证系统的调焦精度成为本次实验的关键。本文提出的方法基于成像系统满足线性条件和空间不变性条件。线性条件是指在非相干照明的条件下, 光学系统的物方图样与像方图样之间的光强度满足线性叠加的条件。满足线性条件的光学系统, 其像面上任一点 (x', y') 处的光强等于物面上各点的光强 $o(x, y)$ 在像平面 (x', y') 处所形成的光强的叠加, 如图 3 所示。像面的光强度分布为

$$E(x', y') = \iint_{\sigma} o(x, y) h(x, y, x', y') dx dy \quad (1)$$

式中, σ 为物面内物体光强度分布范围; $h(x, y, x', y')$ 为系统的脉冲响应函数, 即光强度为单位值的物点 (x, y) 经光学系统后, 在象面上

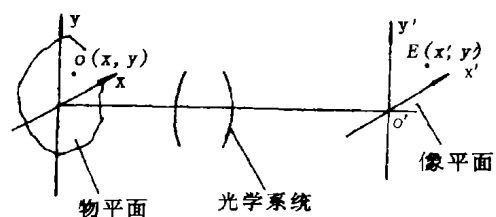


图 3 光学系统的成像

Fig. 3 Imaging of the optical system 形成的光强度分布。

若物面处物体范围外的光强度为零,则上式可写为

$$E(x',y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x,y)h(x,y,x',y')dxdy \quad (2)$$

可见,利用系统线性叠加的特性,可将物方图样分解为许多基元图样的线性组合。系统满足空间不变性是指:物面任意位置 (x,y) 处光强度为单位值的物点在像平面所形成的光强度分布是相同的。即当物点沿物面 (x,y) 移动时,仅仅改变点像在像面的空间坐标位置,而不改变点像分布函数的形式,其脉冲响应函数仅是像点的空间坐标位置差 $(x'-x)$ 和 $(y'-y)$ 的函数,即

$$h(x,y,x',y')=h(x'-x,y'-y)$$

此时,(2)式可改写为

$$E(x',y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x,y)h(x'-x,y'-y)dxdy \quad (3)$$

上式反映线性空间不变性系统的一个成像过程,即像的光强度分布可表示为物面光强度分布与脉冲响应函数的卷积。因此,脉冲响应函数完全决定了系统的成像特性。

光学系统的空间不变性条件又称等晕条件。它要求物面上任意物点,在像面上都有相同的光强分布,即有相同的成像质量。但在实际光学系统中,由于光瞳孔径的衍射,存在残余像差及工艺缺陷等,实际上只是在像点 (x',y') 附近较小范围内才满足空间不变性条件。将这一区域称为等晕区。在用(3)式时,只要将物平面划分为一系列对应的等晕区,并给出每一等晕区的脉冲响应函数,便可判定各等晕区的成像情况。

在非相干照明条件下,点像的光强度分布函数 $h_0(x,y)$ 的归一化光强度分布为点扩散函数,即

$$PSF(x,y) = h_0(x,y) / \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h_0(x,y)dxdy$$

则,(2)式又改写为

$$E(x',y') = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x,y)PSF$$

$$\times [(x' - x, y' - y)dxdy] \quad (4)$$

此式表明像面的光强度分布是物面的光强度分布和点扩散函数的卷积^[2,4]。

一个几何点经过一个理想的光学系统,在焦面位置上成像为一理想点,而在离焦位置上(Δ 为离焦量)呈现弥散斑,弥散斑的形状与光学孔径形状相似。本实验的光学孔径为圆形(透镜),则系统的点扩散函数为^[4]。

$$PSF(x,y) = \frac{A}{(\frac{D}{f'}\Delta)^2} \text{circ}(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\frac{D}{f'}\Delta})$$

$$\text{circ}(r) = 1(r \leq 1), \text{circ}(r) = 0(\text{其它})$$

式中, A 为常数; f'/D 为 F 数; Δ 为离焦量。因此,成像系统在离焦时的成像强度分布为

$$E(x',y') = E(x,y) \mathcal{M} PSF(x,y) = \frac{A}{(\frac{D}{f'}\Delta)^2} E(x,y) * \text{circ}(\frac{\sqrt{x^2+y^2}}{\frac{D}{f'}\Delta}) \quad (5)$$

式中, \mathcal{M} 表示卷积。当采用玻罗分划板作目标时, $E(x,y) = \text{rect}(x/t)$ 。式中, t 为分划板某一刻线宽度,为已知值。由计算可得:焦面上,像图样仍为矩形,宽度等于 βt ;在离焦时,像图样为一梯形,如图4所示。离焦量越大,梯形底边越长。在正焦时,底边最短,等于矩形的宽

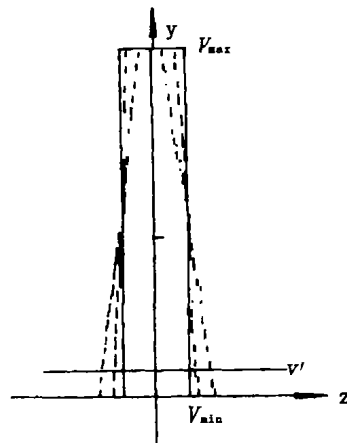


图4 像图样的理论分布

Fig. 4 Theoretical distribution of image pattern 度。对于理想的线阵 CCD, 梯形底边宽度 (CCD 受光像素数) 可作为判定焦面的依据。但由于 CCD 光敏单元的不均匀性, CCD 中暗

电流和电噪声的影响,需选取一合理的阈值,计算阈值电压被梯形所截的宽度 d ,把它作为本实验的焦面评判依据。但是,阈值的选取很关键,阈值选得过大,调焦精度不够;选得过小,不能滤除暗电流与噪声的影响。经实验验证,选取阈值电压为

$$V' = 0.1(V_{\max} - V_{\min}) + V_{\min}$$

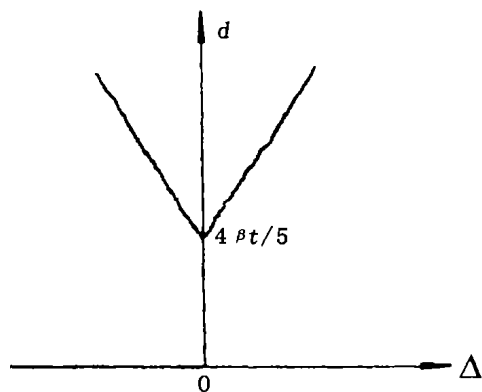


图5 $d - \Delta$ 理论曲线

Fig. 5 Theoretical $d - \Delta$ curves

在选取的阈值电压下,对实验中使用的 CCD(像元间距为 $7\mu\text{m}$),利用(5)式进行计算,可得到 d 与离焦量 Δ 的关系:

$$d = 4\beta(t + |\Delta|D/f')/5$$

离焦量(μm)	-20	-16	-12	-8	-4	0	4	8	12	16	20
CCD 受光 像素数目(d)	104.8	99.1	96.2	93.4	92.4	89.5	96.4	97.4	98.7	103.1	105.4

从表中我们可以看到, $4\mu\text{m}$ 的调焦精度是可以分辨的。根据所测数据,作出 $d - \Delta$ 曲线,如下图所示。

将图 6 与图 5 进行比较,不难发现:图 6 中,对应于不同的离焦位置,曲线的斜率是不同的,但是曲线的变化趋势与图 5 是吻合的。由于理论结果是在 CCD 为理想情况下获得的,而在实际测量中,CCD 像元的非均匀性及不完全的电荷转移等因素都会对 d 的测量有影响,因此曲线斜率有变化是可以理解的。

结果见图 5。

4 精度分析

对于理想的无衍射光学系统,在所选取的阈值电压下,系统所能分辨的最小距离为 CCD 的一个像元宽度 L ,因此,有公式

$$\frac{4}{5}\beta \frac{D}{f'}\Delta \geq L$$

将系统的放大倍率 $\beta = 10$, F 数(f'/D) = 1.7, $L = 7\mu\text{m}$ 代入上式,可得系统可分辨的最小离焦量 $\Delta \geq 1.5\mu\text{m}$ 。考虑衍射效应,衍射极限为爱里斑的宽度 L' ($L' = \frac{1.22\lambda}{D}f'\beta$)^[3],则上式改写为

$$\frac{4}{5}\beta \frac{D}{f'}\Delta \geq L + L'$$

经计算可得 $\Delta \geq 3.9\mu\text{m}$,即系统的调焦精度在 $\pm 4\mu\text{m}$ 范围内。与目测的调焦精度相比,大约高于 $1.5\mu\text{m}$ 左右,说明此方法具有实用价值。

5 实验结果

按照上述原理与方法进行实验,得到如下结果:

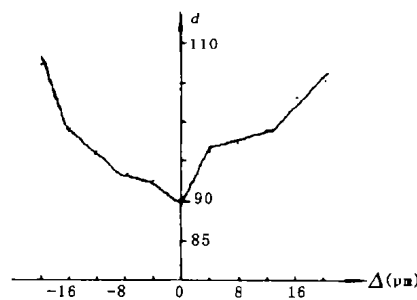


图6 $d - \Delta$ 实验曲线

Fig. 6 Experimental $d - \Delta$ curves

(下转第 35 页)

方的战略动向。

4.3 目标识别定位

成像光谱测量所采集的波段图像可起到删除背景的作用,使目标更加清晰。战机和坦克车可利用成像光谱仪的这一特点,在夜间识别和跟踪目标。

4.4 雷区探测

成像光谱仪可供无人驾驶机使用,利用其低空飞行,昼夜探测敌方布雷区的活动。

4.5 其它方面应用

国家可利用机载成像光谱测量技术探测地面植被分布情况,及时调整,达到环境保护的目的;还可及时探测森林火情的具体情况,为森林灭火指挥者提供现场画面,以及为国家数字地球服务。

参考文献:

- [1] Carbone J. Advanced solid-state array spectral-radiometer (ASAS) noise reduction contract [P]. N60001-84M3198,1985.
- [2] G Vane. Proceedings of the 1984 IEEE international geoscience and remote sensing symposium [J]. 1984,SP215:751-757.
- [3] Wallace M Porter. System overview of the airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS) [J]. SPIE,1987,834:22-31.
- [4] 李对楷,薛永祺. 高效三维遥感集成技术系统 [M]. 北京:科学出版社,2000.
- [5] Robinson B F. Multiband radiometer for field research [J]. SPIE, 1979,196:8-155.

RESEARCH ON IMAGING SPECTROGRAHP

WU Bao-ning, WANG Xue-wu, LIU Jian-ping, YUAN Liang, YANG Feng

(Xian Institute of Applied Optics, Xian 710065, China)

Abstract: study scheme of each system and the principle of the imaging spectrograph are described in details. The optical design of controlling linear polarization light is proposed and the spectral correlation is analyzed. Finally, the application foreground of the imaging spectrograph is introduced.

Keywords: spectrum; multispectrum; imaging spectrograph; remote sensing technology

(上接第28页)

参考文献

- [1] 郭友寒,杨朋利. 大型光学系统焦距的精确测量 [J]. 应用光学,1999,20(2):45-48.
- [2] 杨志文,等. 光学测量[M]. 北京:北京理工大学

出版社,1995.

- [3] 蔡履中,王成彦. 光学[M]. 济南:山东大学出版社,1992.
- [4] 韩昌元. 信息光学基础理论及其应用[M]. 长春:长春出版社,1989.

STUDY ON METHOD OF AUTOMATIC FOCALIZATION TO MEASURE FOCAL LENGTH OF LENS ON LIGHT-UTENSIL SEAT

ZHANG Wei, ZHANG Xiao-hui, LIU Zhen-jiang

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Academia Sinica, Changchun 130021, China)

Abstract: Linear CCD is used as receiver on behalf of eyes on the basis of originally experimental equipment measuring the focal length of lens. The correct determination to the focal plane is the key of the experiment. A method which is based on the theory of point scatter function is put forward and analysed theoretically in this paper, and the analysis is proved with the results of the experiment. The results show that the focalizing precision of the method comes to $\pm 4\mu\text{m}$. Compared with the precision measured with eyes, it's about 1.5 μm superiority.

Keywords: focal length; linear CCD; point scatter function